

# Оптический журнал

УДК 535.233.4

## Калибровка моделей абсолютно черных тел для тепловидения и пирометрии

© 2017 г. Е. И. Алешко; А. И. Гараева; В. И. Курт, доктор техн. наук

Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», Казань

E-mail: gipo@telebit.ru

Поступила в редакцию 18.10.2016

Рассмотрены вопросы поверки и калибровки моделей абсолютно черных тел, применяемых при определении характеристик оптико-электронных приборов, работающих в различных областях спектра. Показано, что при одной и той же термодинамической температуре модели абсолютно черного тела ее яркостные температуры в различных спектральных диапазонах не равны. Приведено сравнение усредненных поправок к показаниям термометра аттестуемого излучателя и рассчитанных поправок на конкретной длине волн излучения.

**Ключевые слова:** тепловизионный прибор, модель абсолютно черного тела, поверка, спектральный диапазон работы модели абсолютно черного тела, поправки к показаниям термометра поверяемой модели абсолютно черного тела.

**Коды OCIS:** 120.5240, 120.3940

Для измерения энергетических характеристик тепловизионных приборов, а также градуировочных характеристик пирометров различного назначения применяют модели абсолютно черных тел (МАЧТ). Поверка МАЧТ проводится путем сличения ее характеристик с характеристиками МАЧТ более высокого уровня точности (рабочие эталоны) с помощью радиометра-компаратора или методом прямых измерений с помощью образцовых пирометров 1-го разряда [1].

Тепловизионные приборы, как правило, работают в диапазонах спектра 3–5 и 8–12 мкм. Рабочие спектральные диапазоны оптических пирометров более разнообразны. Например, спектральные диапазоны пирометров фирмы ДИЭЛТЕСТ имеют следующие параметры: 0,6–0,9, 0,9–1,1, 1,1–1,6, 0,9–4,5, 1,1–4, 1,2–4 и 8–14 мкм.

ГОСТ [2] предписывает проводить сличения МАЧТ по полному излучению, в отдельных спектральных диапазонах (частичное излучение) — на спектрометрах. При этом, если не указана область применения МАЧТ, то в диапазоне температур –50–300 °C сличение МАЧТ необходимо проводить радиометром-компаратором полного излучения, а в диапазоне 300–1000 °C — радиометром-компаратором частичного излучения, в диапазоне выше 1000 °C — на спектрометрах в интервалах длин волн, определяемых назначением поверяемого МАЧТ.

Проведем оценку поправок к показаниям термометра аттестуемого излучателя в условиях различных температур и спектральных диапазонов сличения МАЧТ.

Сличения проводят методом уравнивания сигналов от эталонного и поверяемого излучателей, регулируя температуру эталонного излучателя, которая при равенстве сигналов приписывается поверяемому излучателю. Разность температур эталонного излучателя и поверяемого (по его термометру) есть поправка  $\Delta t_m$ .

Оценка проводилась в спектральных интервалах с эффективными длинами волн  $\lambda_{\text{eff}} = 1, 4, 10 \text{ мкм}$  и для полного излучения ( $0 < \lambda < \infty$ ).

Расчет яркостных температур в спектральных интервалах проводился по формулам

$$T_L = \frac{C_2}{\lambda \ln[C_1 / (\pi \lambda_{\text{eff}}^5 L_n) + 1]}.$$

Здесь  $C_1, C_2$  — постоянные излучения,  $\lambda_{\text{eff}}$  — эффективная длина волны спектрального интервала,  $L_n$  — спектральная плотность энергетической яркости поверяемого излучателя на  $\lambda_{\text{eff}}$  где  $L_n = L_{0\lambda} \varepsilon_{0,n} + (1 - \varepsilon_{0,n}) L_{\lambda, \text{hum}}$  — в температурном диапазоне 220–353 K, при температурах не менее 350 K второе слагаемое не учитывалось,  $L_{0\lambda}$  — эффективная яркость идеального излучателя при температурах уравнивания,  $\varepsilon_{0,n}$  — излучательная способность эталонного (0) либо поверяемого ( $n$ ) излучателей,  $L_{\lambda, \text{hum}}$  — эффективная яркость фона.

Результаты расчетов приведены в таблице. Расчеты проводились для случая, когда излучательная способность эталонного излучателя  $\varepsilon_0 = 0,999$  и поверяемого  $\varepsilon_n = 0,99, T_{\text{hum}} = 295 \text{ K}$ .

### Расчетные яркостные температуры

$\lambda_{\text{eff}}$ , мкм	$T_0$ , К	$T_{0L}$ , К	$T_{nL}$ , К	$\Delta t_m$ , °C
10	233	233,091	233,909	+0,82
0–∞	233	233,101	234,013	+0,91
4	310	309,988	309,881	-0,107
10	310	309,986	309,860	-0,126
0–∞	310	309,986	309,860	-0,126
4	350	349,973	349,729	-0,24
10	350	349,960	349,59	-0,37
0–∞	350	349,957	349,566	-0,4
1	1000	999,93	999,3	-0,63
4	1000	999,73	997,29	-2,4
10	1000	999,47	994,69	-4,8
0–∞	1000	999,75	997,49	-2,26
1	1273	1272,89	1271,87	-1,02
4	1273	1272,58	1268,75	-3,83
10	1273	1272,24	1265,37	-6,87
0–∞	1273	1272,68	1269,80	-2,88

Знаки «+» и «-» в колонке  $\Delta t_m$  означают, что температуру эталонного излучателя надо поднять или опустить на  $\Delta t_m$ , чтобы получить равенство сигналов компаратора.

Как видно из таблицы, поправки к показаниям термометра в различных спектральных интервалах разные даже при излучательной способности поверяемого излучателя 0,99, что вытекает из зависимости  $L = f(T)$  в этих интервалах, т.е. даже у «серого» излучателя с высокой излучательной способностью яркостные температуры в различных областях спектра не равны.

В ГОСТе [2] предлагаются поправки, полученные в различных спектральных диапазонах, усреднять и максимальное отклонение поправки от среднего учитывать как составляющую погрешности. И только «допускается приводить в сертификате значения поправок для каждого диапазона» при калибровке. По мнению авторов настоящей статьи, такой подход в определенных случаях является некорректным. Один и тот же источник излучения на основе МАЧТ может использоваться при определении характеристик оптико-электронных приборов (ОЭП), работающих в различных спектральных диапазонах. При более высоких температурах (от 1000 °C) усреднение отклонений может привести к возникновению существенной неучтенной погрешности.

Так, при температуре 1273 °C при использовании источника излучения для определения характеристик двух ОЭП, имеющих максимумы чувствительности на длинах волн 1 и 10 мкм соответственно, значение усредненной поправки составляет -3,95 °C. В то же время рассчитанная поправка составляет -1,03 °C на длине волн 1 мкм. С учетом того, что для рабочих эталонов первого разряда, согласно поверочной схеме [1], доверитель-

ные границы абсолютной погрешности составляют 5 °C в точке 3000 °C, а при температуре 1273 °C это значение будет существенно меньше, усредненная поправка переводит такой источник излучения в более низкий разряд.

Считаем, что поправки в каждом спектральном интервале должны определяться отдельно. Усреднение поправок возможно, если они близки и находятся в пределах воспроизводимости результатов измерений по общей выборке или выборке по спектральным интервалам. Это может быть в том случае, если излучающая полость поверяемого излучателя имеет коэффициент излучения, близкий к коэффициенту излучения излучающей полости эталонного излучателя.

Анализ результатов расчетов, приведенных в таблице, позволяет сделать вывод, что в диапазоне температур 273–330 °C усреднение поправок в различных спектральных интервалах можно провести без потери точности поверки излучателя в каждом спектральном интервале.

В этом диапазоне температур важна фоновая составляющая яркости. При изменении температуры фона (температуры камеры, в которой калибруются излучатели) поправки изменяются тем больше, чем меньше излучательная способность поверяемого излучателя. При поверке температуру фона необходимо фиксировать и записывать ее в свидетельство о поверке.

В ГОСТе [2] не указывается, что в качестве эталонных используются излучатели только полостного типа. В то же время в ГОСТе [3] для поверки некоторых характеристик тепловизоров-радиометров используется «эталонный (образцовый) протяженный излучатель», излучательная способность которого может быть 0,96. А указанная погрешность (1,1 °C) выводит его в поле рабочих эталонов 2-го разряда по поверочной схеме [1].

Считаем, что в ГОСТе [2] необходимо конкретизировать на уровне допускаемых пределов требования к техническим характеристикам эталонных излучателей и дополнительно ввести характеристику «коэффициент излучательной способности», являющейся количественной оценкой эффективности излучения излучающей полости МАЧТ.

Проверку качества МАЧТ по этой характеристике можно проводить в рамках ГОСТа [2], а именно в том пункте, где определяются поправки  $\Delta t_m$ , полученные в разных спектральных интервалах. Критерием качества МАЧТ по характеристике «излучательная способность» может служить именно отличие поправок в 2–3 спектральных диапазонах. И если эти различия пре-восходят какое-то заранее заданное значение поправок для эталонных МАЧТ, то они должны изыматься из обработки или переводиться в более низкий разряд.

### ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ 8.558-2009 ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерения температуры. П. 4.3 «Рабочие эталоны».
- ГОСТ Р 8.566-2012 ГСИ. Излучатели в виде моделей абсолютного черного тела. Методика поверки и калибровки.
- ГОСТ Р 8.619-2006 ГСИ. Приборы тепловизионные измерительные. Методика поверки.